DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO CONVECTIVO AUTOMÁTICO DE ALIMENTACIÓN CONTINUA PARA EL PROCESO DE CARBONIZADO DE 60 KG/DÍA DE LANA PARA LA EMPRESA ESPATEX.

Miguel Alejandro Ruiz Cruz, Jorge Patricio Sánchez Arciniegas

Ing. Oswaldo Mariño, Ing. Tatiana Acosta

Departamento de Energía y Mecánica – Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Mayo 2014

RESUMEN

Para iniciar el diseño se plantea una matriz QFD, la cual identifica las necesidades del cliente y las transforma en requerimientos técnicos para el diseño del sistema. Los resultados obtenidos en dicha matriz indican que los sistemas de transporte, almacenamiento y alimentación, y calentamiento son los más importantes en la máquina.

Al realizar las pruebas de funcionamiento, se pudo evidenciar que la alimentación de lana constituye la parte más compleja debido a que esta no era homogénea desde el almacenamiento hasta el ingreso de la misma al horno. Actualmente con las características de la lana que la empresa ESPATEX trabaja se logra conseguir 45 kg/día.

Con la implantación de la máquina se reduce la utilización de mano de obra en un 60% durante el proceso de carbonizado, se aumenta en un 9% el carbonizado de los restos vegetales en la lana y se evita la quemadura de la lana por temperaturas muy altas. Adicionalmente, se logra un aumento en la producción de un 32%.

PALABRAS CLAVE: CARBONIZADO DE LANA, CONVECCIÓN FORZADA, HORNO DE CARBONIZADO, ALIMENTACIÓN DE LANA, DOSIFICACIÓN DE LANA.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años los avances realizados en la maquinaria textil han obligado a trabajar con materias libres de impurezas, lo que ha ocasionado que las empresas textiles ecuatorianas mejoren la calidad en sus procesos de limpieza.

El creciente interés de la empresa ESPATEX, para ofrecer productos de mejor calidad, en el mercado ecuatoriano trae consigo la incorporación de un nuevo horno para el proceso de carbonizado. Con la implementación de dicho horno se logrará realizar un adecuado proceso de carbonizado, logrando eliminar los restos vegetales en los procesos a continuación.

II. DESARROLLO DEL DISEÑO

A fin de conocer las necesidades del cliente con respecto al diseño y la construcción del proyecto, se realizó una entrevista al gerente de la empresa ESPATEX. Utilizando estos requerimientos en la matriz QFD, se han podido encontrar los principales sistemas de la máquina indicados en la tabla 1 con su respectiva ponderación.

Tabla 1 Sistemas que componen el horno.

No	VARIABLES TENICAS DEL SISTEMA	QFD
1	Sistema de Transporte	18.3
2	Sistema de Almacenamiento y Alimentación	13.3
3	Sistema de Calentamiento	12.6
4	Unidad de control	11.8
5	Manufactura y fácil reemplazo	11.4
6	Sensor para medición de temperatura	8.9
7	Control de variables para los subsistemas.	8.9
8	Precio.	8.4
9	Robustez de la estructura mecánica.	6.4

DISEÑO TÉRMICO

La lana utilizada en la empresa ESPATEX, tiene una densidad de 7.143kg/m^3, Con esto se puede hallar la superficie de lana requerida para obtener la producción diaria. El área se encontró imponiéndose un espesor de 10cm.

$$Alana = \frac{1.88Kg}{\frac{7.143Kg}{m^3} * 10cm}$$

$$Alana = 2.63m^2$$

Toda la lana que se encuentran en el interior del horno debe estar sobre la banda transportadora, que presenta un ancho de 1.20 metros, con esto se determina la longitud mínima del horno.

$$Lhorno = \frac{Alana}{abanda} = \frac{2.63m^2}{1.2m}$$

$$Lhorno = 2.19m$$

Se necesita un coeficiente de convección forzada que ocasiona una transferencia de calor mayor al de la convección natural, el coeficiente de convección forzada esta entre 30 y $300\, \text{W}/(\text{m}^2 * \text{K})$ [1]. El coeficiente de convección difiere en cada caso, por tanto, el coeficiente convectivo debe determinarse independientemente para cada situación y no es posible generalizarlo [2].

Se requiere conseguir un coeficiente de convección forzado de $30\text{W}/(\text{m}^2 * \text{K})$, el mismo que se encuentra representado por la ecuación 1 [3].

$$hi = \frac{Nu * Kaire}{D_{hidraulico}}$$

Dónde, $Kaire$ coeficiente de conductividad térmica del aire [W/(m*K)], Nu: Numero de Nusselt [adimensional], $D_{hidraulico}$: Diámetro Hidráulico [m].

El coeficiente de convección para tubos no circulares están basadas en el diámetro hidráulico el cual está presente en la siguiente relación.

$$D_{hidraulico} = \frac{4 * A}{p}$$

Dónde, A: Área de la sección transversal al flujo del aire, p: Perímetro

$$D_{hidraulico} = \frac{4 * 2.4 * 1.4}{2 * 2.4 + 2 * 1.4}$$

$$D_{hidraulico} = 1.77m$$

Utilizando la ecuación 3.1 se calcula el número de Nusselt requerido.

$$Nu = \frac{hi * D_{hidraulico}}{Kaire} = \frac{30\text{W}/(\text{m}^2 * \text{K}) * 1.77m}{0.032W/(m * K)}$$

$$Nu = 1659.38$$

El número de Nusselt, a su vez se encuentra determinado por la ecuación de Colburn.

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^{0.4}$$

Dónde, Pr es el número de Prandt del aire en las condiciones de trabajo [adimensional], Re es el número de Reynolds [adimensional].

De la ecuación 3 se despeja y se obtiene el número de Reynolds

$$Re = \left(\frac{1659.38}{0.023 * 0.7^{0.4}}\right)^{1.25}$$

$$Re = 1.41\ x\ 10^6$$

Además el número de Reynolds está representado por la siguiente ecuación de la cual se obtiene la velocidad del aire requerida en el interior del horno para obtener una convección forzada.

$$u = \frac{Re * \vartheta}{D_{hidraulico}}$$

$$u = \frac{1.41\ x\ 10^6 * 2.456 * 10^{-5} m^2/s}{1.77m}$$

$$u = 19.61m/s$$

La velocidad de aire que producen los ventiladores axiales viene dada por la siguiente ecuación [4].

$$u = \pi * D * n$$

Dónde, u: es la velocidad del aire producida por el ventilador [m/s], D: es el diámetro promedio de las aspas del ventilador [m], n: son las revoluciones a las que gira el ventilador [rpm].

Los ventiladores comerciales giran a 1700 revoluciones por minuto por lo cual se deberá calcular el diámetro promedio de las aspas del ventilador con el fin de seleccionar los ventiladores a utilizar.

$$D = \frac{u}{\pi * n} = \frac{\frac{20m}{s}}{\pi * 1700rpm}$$

$$D = 0.225\ m \approx 8.86in$$

Con lo que selecciona un aspa de las siguientes dimensiones y un diámetro promedio de 9", como se indica en la figura 1.



Figura 1 Aspas ventilador axial.

Las aspas seleccionadas funcionan adecuadamente con un motor de las siguientes características.

Tabla 2 Requerimientos del motor de los ventiladores.

Potencia	Voltaje	Amperaje	Eje	Rpm
1/4HP	220V	2A	0.5"x 6.5 "	1700

Una vez encontrados los ventiladores con sus aspas, se recalculan los parámetros con el fin de conocer el coeficiente de convección real en el interior del horno.

$$hi = \frac{1712 * \frac{0.032W}{m * K}}{1.77m}$$

$$hi = 30.95 \frac{W}{m^2 K}$$

Ya obtenido el coeficiente de convección del horno se calcula las pérdidas de calor, calculando la resistencia térmica total, además se calcula el espesor adecuado para reducir en un 90% las pérdidas de calor.

$$R_{total} = R_{conv\ externo} + R_{cond1} + R_{cond2} + R_{cond3} + R_{conv\ interno}$$

$$R_{total} = \frac{1}{h1} + \frac{x1}{k1} + \frac{x2}{k2} + \frac{x3}{k3} + \frac{1}{h2}$$

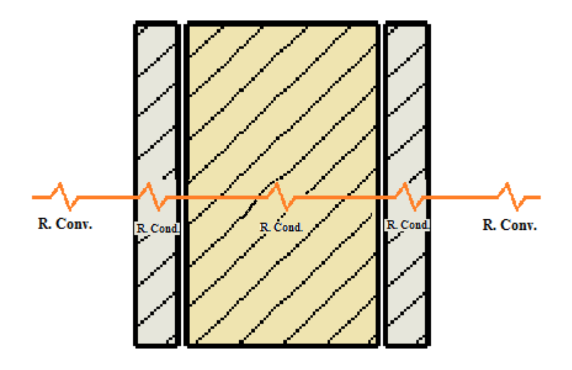


Figura 2 Resistencias térmicas.

$$\frac{q_{con\ aislante}}{q_{sin\ aislante}} = 1 - \%Aislamiento = \frac{\sum R_t\ sin\ aislante}{\sum R_t\ con\ aislante}$$

Cálculo de la resistencia térmica sin aislante:

$$R_t\ \text{sin}\ aislante = \frac{1}{15 \frac{W}{m^2 * K}} + \frac{0.7mm}{43 \frac{W}{m * k}} + \frac{0.7mm}{43 \frac{W}{m * k}} + \frac{1}{31 \frac{W}{m^2 * K}}$$

$$R_t\ \text{sin}\ aislante = 0.099 \frac{K * s^3}{kg}$$

Cálculo de la resistencia térmica con aislante:

$$R_t\ \text{con}\ aislante = \frac{R_t\ \text{sin}\ aislante}{0.10}$$

$$R_t\ \text{con}\ aislante = 0.99 \frac{K * s^3}{kg}$$

$$R_t\ \text{con}\ aislante = R_t\ \text{sin}\ aislante + \frac{x3}{0.038 \frac{W}{m * k}} = 0.99 \frac{K * s^3}{kg}$$

$$x3 = 33.86mm$$

Una vez encontrada la resistencia equivalente con aislante se procede a calcular las pérdidas ocurridas en las paredes del horno.

$$q_{paredes} = \frac{A * \Delta T}{R_t\ \text{con}\ aislante}$$

$$q_{paredes} = \frac{11.198m^2 * (285.15K - 393.15K)}{0.99 \frac{K * s^3}{kg}}$$

$$q_{paredes} = 1222W$$

Debido al ingreso y a la extracción de la lana desde el horno se tendrán dos orificios de dimensiones 1400x300 milímetros por los cuales se va a presentar una pérdida de calor ocurrida por convección.

$$q_{orificios} = 2A * h * \Delta T = 2 * 0.42m^2 * 15\frac{W}{m^2 * K} * 108K$$

$$q_{orificio} = 1416W$$

Por lo que las pérdidas de calor en el horno serán las siguientes.

$$q_{ptotal} = (q_{paredes} + q_{orificio}) * 1.82$$

$$q_{ptotal} = 4.8KW$$

CALOR ABSORBIDO POR LA CARGA.

Una vez que todos los componentes del horno (recubrimiento interno, externo, aislante térmico, banda transportadora) han llegado a estabilizarse, o han pasado el estado transitorio el horno necesita generar calor para incrementar la temperatura de la lana y de la banda transportadora que se encuentra ingresando de manera continua (Estado Estable). El calor impartido a la carga se representa por la siguiente ecuación:

$$Q = m * Cp * \Delta T$$

Dónde, Q: calor impartido a la carga [W].m: masa del elemento a calentar [kg]. Cp: calor específico del elemento [J/(kg*K)]. ΔT: Variación de temperatura del elemento [K].

Se calcula potencia térmica requerida por el sistema en estado transitorio, y en estado estable. El horno no debe de tardar más de 20 minutos para pasar de la temperatura ambiente a la temperatura requerida de 120°C.

La potencia térmica en estado transitorio es de 25 kW y en estado estable es de 22.92kW.

CÁLCULO DEL TRANSITORIO DE LA LANA.

Cuando se altera la temperatura superficial de la lana, la temperatura en varios puntos de la misma comenzará a cambiar hasta que se alcance una distribución de temperaturas en estado estable, o en otras palabras que todo el espesor de la lana se encuentre entre los rangos de temperatura requeridos.

Para conocer cuánto tiempo se demora la lana legar a la temperatura requerida, es necesario calcular el número de Biot.

$$Bi = \frac{h * L}{K} = \frac{\left(\frac{31W}{m^2 * K}\right) * 0.1m}{\frac{0.046W}{m * K}} = 67.39$$

Debido a que el número de biot es alto se puede utilizar una solución aproximada el cual utiliza el primer número de la siguiente serie. [5]

$$\frac{T - T\alpha}{Ti - T\alpha} = \sum_{n=1}^{\alpha} C_n * e^{(-\xi^2{}_n * Fo)} * \cos(\xi_n * X)$$

El coeficiente Cn se calcula por la siguiente ecuación:

$$Cn = \frac{4sen\xi_n}{2\xi_n + sen(2 * \xi_n)}$$

Donde los valores característicos (eigenvalores) de ξ_n son las raíces positivas de la ecuación trascendente.

$$Bi = \xi_n tan\xi_n$$

Los valores C1=1.2731 y ξ_1=1.5552 fueron tomados de la tabla 5.1 de Incropera de una pared plana. Con estos datos se analizó el tiempo que se demora la lana en alcanzar 120°C, para diferentes espesores de lana.

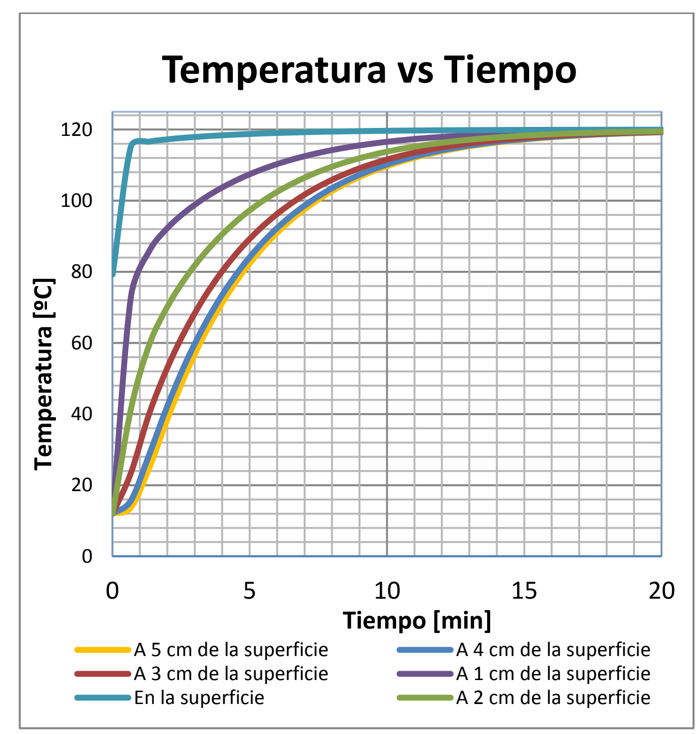


Figura 3 Distribución de temperaturas vs tiempo a diferentes espesores.

Toda la lana a partir de los 7.5 minutos se encuentra entre los rangos de temperatura requeridos (100 a 120 grados

centígrados), manteniéndose en el interior del horno a esa temperatura 7.5 minutos más aproximadamente. Recalculando las dimensiones del horno para un tiempo de horneado de 19 minutos, se deberá aumentar la longitud inicial del horno de 2.4 metros a 2.8 metros.

SELECCIÓN DE LA FUENTE ENERGÉTICA.

Se analizan los costos para producir la potencia térmica requerida, utilizando los precios de las fuentes energéticas a la fecha del proyecto obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 1 Costos de las fuentes energéticas

Costo mensual de la producción mensual de potencia térmica	
Fuente Energética	**Costo mensual [USD]**
Diésel	178
G.L.P.	454.69
Electricidad	436.57

Se selecciona un quemador de diésel Riello F5, el cual produce una potencia térmica de 30-60kW, siendo suficiente para nuestro sistema.

DISEÑO ESTRUCTURAL

Una vez conocidos todos los elementos que van a ir sobre el horno se requiere calcular, las fuerzas que actúan sobre la estructura causadas por dichos elementos, con el fin de calcular las dimensiones adecuadas de los elementos estructurales.

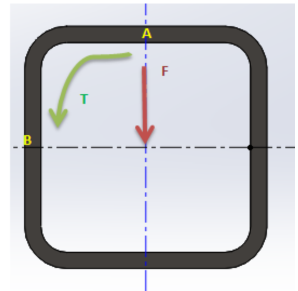


Figura 4 Fuerzas de la sección.

Los materiales existentes en el mercado son el acero ASTM A36 y ASTM A500, para los cuales tenemos las siguientes características.

Tabla 2 Propiedades mecánicas acero según ASTM

Material	Límite de fluencia
ASTM A36	250 MPa
ASTM A500	320 MPa

Como se tiene el factor de seguridad y el límite de fluencia de los materiales se debe encontrar el esfuerzo con la siguiente relación:

$$\sigma_1 = \frac{S_y}{F.S.}$$

Despejando de la relación

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \tau_{max} \wedge \sigma_x = \frac{M * c}{I}$$

Dónde, M: Momento cortante [J], c: Distancia del eje neutro [mm], I: Inercia [mm^4].

Para calcular inicialmente se utiliza un perfil de 2 mm de espesor de sección cuadrada, se obtiene:

$$\frac{c}{I} = \frac{\left(\frac{S_y}{F.S.} - \tau_{max}\right) * 2}{M}$$

$$\frac{\frac{w}{2}}{w * \frac{w^4}{12} - \frac{(w-2t)-(w-2t)^3}{12}} = \frac{\left(\frac{S_y}{F.S.} - \frac{0.5 * S_y}{F.S.}\right) * 2}{F * l}$$

Dónde, w: dimensión del perfil [mm], t: espesor del perfil [t], F: fuerza [N], l: distancia a la fuerza [mm], S_y: Resistencia a la fluencia [MPa].

$$\frac{\frac{w}{2}}{w * \frac{w^4}{12} - \frac{(w-2t)-(w-2t)^3}{12}} = \frac{\left(\frac{320\ MPa}{2.33} - \frac{0.5 * 320\ MPa}{2.33}\right) * 2}{882.594\ N * 215\ mm}$$

$$w = 26\ mm$$

Tabla 3 Dimensiones de perfiles

Material	Espesor [mm]	Dimensión calculada [mm]	Dimensión comercial [mm]
ASTM A36	1.2	38	40
	1.5	32	40
	2	27	30
ASTM A500	1.2	34	40
	1.5	29	30
	2	26	30

La selección del perfil es un acero según la norma ASTM 500 grado C, el cual cumple con el factor de seguridad. La disponibilidad del material en el mercado local, siendo un perfil cuadrado de 30 mm y 1.5 mm de espesor.

Recalculando para las dimensiones comerciales del perfil seleccionado se obtiene un factor de seguridad de 2.56.

ALIMENTACIÓN

Para el ingreso automático de la lana desde la tolva a la banda transportadora, existen dos alternativas, la primera utilizando 2 rodillos con aletas, y la segunda utilizando 3 rodillos con guarniciones de lana.

Por razones de costo se utilizaron los rodillos con aletas para el sistema de alimentación. Como se indica en la siguiente figura.

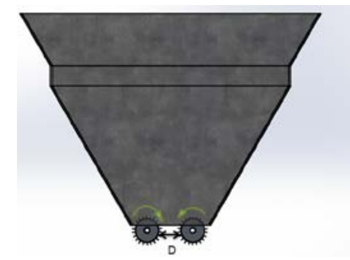


Figura 5 Extracción de lana por medio de rodillos con aletas.

Con este sistema los rodillos alimentan la lana de manera homogénea desde la tolva hacia la banda transportadora, sin embargo la lana que ingresa presenta un espesor de 20 cm y no cumple con el requerimiento de diseño térmico de 10cm de espesor como máximo. Se redujo la separación de los rodillos de alimentación desde 5cm hasta 0.5cm entre ellos y no se observaron cambios significativos en el espesor, sin embargo el torque que necesitaban los rodillos para alimentar la lana aumento considerablemente. Por lo que se realizó la implementación similar a los 3 rodillos con guarniciones de una carda. Para obtener resultados adecuados en la alimentación con este sistema se debe tener en cuenta 4 puntos.

- Sentido de giro entre los rodillos.
- Sentido de las guarniciones. (Simétrico o asimétrico)
- Relación de velocidades entre rodillos.
- Distancia de separación entre rodillos.

Las fibras de lana encontradas en el interior de la tolva no han sido trabajadas ni abiertas, razón por la cual se seleccionan guarniciones rígidas para los 3 rodillos de alimentación de la tolva.

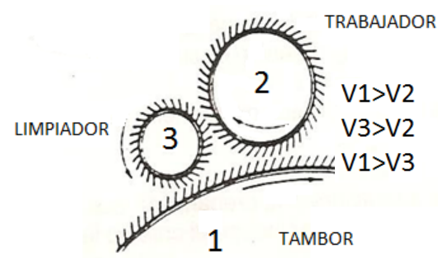


Figura 6 Funcionamiento de rodillos en una cardadora. [6]

La figura 6 indica el funcionamiento, del transporte y extracción de exceso de lana, dentro de una cardadora. El rodillo trabajador debido a que presenta guarniciones asimétricas con el tambor, quita el exceso de lana, en ese momento el rodillo limpiador con guarniciones simétricas y por diferencia de velocidades extrae la lana del rodillo trabajador, y el tambor extrae la lana del rodillo limpiador debido a que este gira a mayor velocidad.

Para alimentar y transportar un espesor menor de 10cm de lana, al interior del horno, se ha seleccionado un rodillo de alimentación y otro encargado de retirar el exceso de lana (Rodillo Dosificador). Además va a existir la presencia de una telera encargada de retirar la lana del rodillo de alimentación y transportarla hacia la banda transportadora principal.

Entre el rodillo de alimentación y el rodillo de dosificación, se debe tener guarniciones asimétricas con sentidos de giro directo, a cualquier velocidad con el fin de extraer el exceso de lana del rodillo de alimentación. La telera debe de presentar guarniciones simétricas entre los rodillos de alimentación y de dosificación y tener una velocidad lineal mayor que los dos rodillos, con el fin de extraer la lana de los rodillos y llevarla hacia la banda trasportadora.

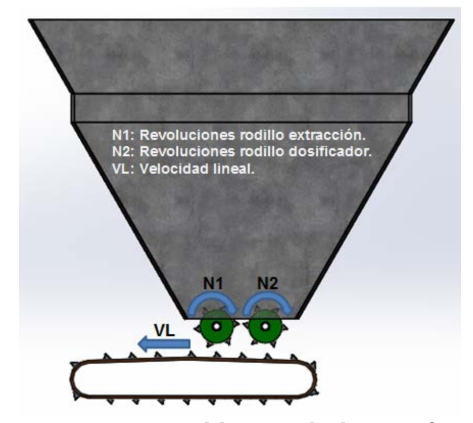


Figura 7 Esquema del sistema de alimentación.

TRANSPORTE Y MOVIMIENTO

La banda transportadora gira a una velocidad lineal de 0.158 m/min, para tener una alimentación continua, la telera encargada de la alimentación, tiene que girar a la misma velocidad, y para que ocurra una entrega de lana, de los rodillos, a la telera, la telera debe de tener una velocidad línea de 3 o más veces mayor que los rodillos de alimentación.

El sistema de reducción deberá ser dimensionado de tal manera que los diferentes componentes de la máquina giren a la velocidad angular calculada y que tengan la fuerza necesaria para transmitir este movimiento.

Tabla 4 Velocidades angulares de los componentes de la máquina.

Componente	Velocidad angular [RPM]
Rodillo banda transportadora	0.18
Rodillo telera	0.44
Rodillos de alimentación	0.13

El motor que se va a instalar es de 4 polos, el mismo que será conectado a un variador de frecuencia, la mínima frecuencia que recomienda el fabricante para utilizar en el motor es de 6Hz, debido que a frecuencias bajas el motor tiende a calentarse.

$$N = \frac{120 * F}{P}$$

Dónde, N: Velocidad en rpm del motor [rpm], F: Frecuencia de trabajo del motor [Hz], P: Numero de polos del motor [adimensional].

El variador de frecuencia podrá trabajar desde 6Hz hasta los 60Hz por lo que las velocidades del motor serán.

$$N_{Baja} = \frac{120 * 6}{4} = 180\ rpm$$

$$N_{alta} = \frac{120 * 60}{4} - 1800\ rpm$$

La empresa ESPATEX presentaba en sus instalaciones una caja reductora con una relación de transmisión de 85.5 la cual se utilizó a la salida del motor de 4 polos.

$$Ncaja = \frac{Nbaja}{85.5}$$

$$Ncaja = 2.1rpm$$

Utilizando la frecuencia mínima de trabajo del variador de frecuencia se obtuvo una velocidad a la salida de la caja reductora de 2.1 revoluciones por minuto, para la velocidad con la que debe de girar el rodillo de la telera se debe encontrar la relación de transmisión.

$$icaja - telera = \frac{Ncaja}{0.44rpm} = 4.79$$

Debido al espacio físico se va a diseñar una relación de transmisión de 2 pasos, en el primer paso se realizara una relación de transmisión de 3, en el segundo paso una relación de transmisión de 1.6. Los dos pasos darán como resultado una relación de transmisión de 4.8, la requerida por el sistema.

La velocidad del rodillo de la telera con sistema de transmisión seleccionado es:

$$Ntelera_{final} = \frac{Ncaja}{4.8}$$

$$Ntelera_{final} = 0.439rpm$$

Desde el rodillo de la telera se va a transmitir el movimiento hacia el rodillo de la banda transportadora y hacia el rodillo de alimentación. La relación de transmisión para obtener la velocidad de la banda transportadora será.

$$i_{telera-\ banda} = \frac{Ntelera_final}{Nbanda} = 2.437$$

Para obtener la relación de transmisión de 2.4 por lo que la velocidad del rodillo de la banda transportadora final es de 0.183 rpm. De la misma forma se calcula la relación de transmisión requerida para los rodillos de alimentación.

$$i_{telera-\ alimentacion} = \frac{Ntelera_final}{Nalimentacion} = 3.37$$

Obteniendo una relación de transmisión de 3.43 y una velocidad de los rodillos de alimentación de 0.128 rpm. Además se va a utilizar una reducción de 2.5 para mover el rodillo dosificador,.

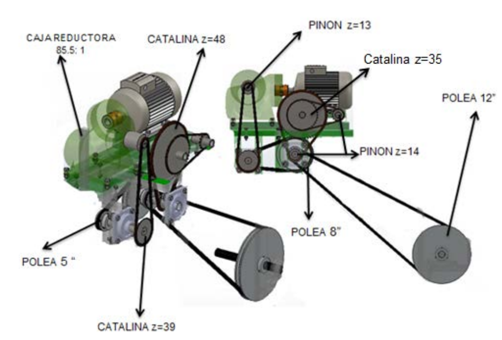


Figura 8 Distribución del sistema de reducción.

SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL MOTOR

A más de 1000 metros del nivel del mar, la potencia real del variador de frecuencia y del motor serán menores a las nominales, debido a que el variador de frecuencia va a funcionar a un décimo de la frecuencia nominal del motor, se debe de utilizar un factor de reducción del par nominal de 0.6 con el fin de evitar algún tipo de sobrecalentamiento.

El motor va a trabajar a una altura de 2225 metros sobre el nivel del mar y a una temperatura de 35 grados centígrados, por lo que el factor de seguridad por temperatura y altura es de 0.94.

Por lo que la potencia del motor queda representada por la siguiente ecuación.

$$PM = \frac{FS * \sum PRodillos}{FRP * FTA}$$

Dónde, PM: Potencia del motor [hp], FS: Factor de seguridad [adimensional], ∑ PRodillos: Sumatoria potencia de los rodillos [W], FRP: Factor de reducción del par nominal [adimensional], FTA: Factor de seguridad por temperatura y altura [adimensional].

$$PM = \frac{1.82 * 403W}{0.6 * 0.94} = 1300W$$

$$PM = 1.744\ hp$$

Se selecciona el motor eléctrico con las siguientes características:

Tabla 5 Datos técnicos del motor del sistema de transporte y alimentación.

Potencia	Voltaje	Amperaje	Eje	Velocidad
2 HP	220VAC	7A	0.5 pulgadas	1800 RPM

SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

Se debe calcular el factor de corrección de la altitud para la corriente de salida del variador según la norma IEEE C37.40.

$$ACF = 1 - 0.02\frac{H-1000}{1000}$$

Dónde, H: altitud en metros

$$ACF = 0.976$$

El factor de corrección por temperatura es de 0.952, bajo la norma IEEE C37.4 por lo que la corriente real que va a transmitir el variador de frecuencia, esta representado por la siguiente ecuación.

$$I_{2200\ m.s.n.m} = I_{variador} * ACF * TCF$$

Dónde, $I_{variador}$: corriente nominal del variador [A], ACF: factor de corrección por altitud [adimensional], TCF: factor de corrección por temperatura [adimensional].

$$I_{2200\ m.s.n.m} = 7.8A * 0.976 * 0.952$$
$$I_{2200\ m.s.n.m} = 7.25A$$

Tabla 6 Corriente variadores Siemens SINAMICS G110 a diferentes alturas.

	1000 m.s.n.m	2200 m.s.n.m
I nominal 2 hp	7.8 A	7.25 A
I nominal 3 hp	11 A	10.22 A

El motor presenta una corriente nominal de 7.3 A, por lo que se debe seleccionar un variador de frecuencia de 3 hp.

SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL.

Conociendo los principales elementos eléctricos del diseña, se analiza los elementos de control que harán posible el funcionamiento autónomo de la máquina, para lo cual es necesario determinar las señales de entrada y de salida de los elementos de control como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7 Señales de entrada y salida para los controladores

SEÑALES DE ENTRADA Y DE SALIDA		
Descripción		**Tipo**
Entradas	Arranque del sistema	Digital
	Paro del sistema	Digital
	Paro de emergencia	Digital
	Funcionamiento 1er proceso	Digital
	Funcionamiento 2do proceso	Digital
	Sensor temperatura 1	Analógico
	Sensor de temperatura 2	Analógico
	Protección de encendido de llama	Digital
Salidas	Encendido y apagado del motor	Digital
	Cambio de giro del motor	Digital
	Control velocidad motor	Analógico
	Encendido y apagado del quemador	Digital
	Encendido de los ventiladores	Digital
	Encendido del Extractor	Digital
	Indicador de funcionamiento	Digital
	Indicador de Emergencia	Digital

Por lo que se ha seleccionado un PLC Siemens Logo, con un módulo de expansión de entradas y salidas digitales y un módulo de salidas analógicas, además se seleccionó un controlador de temperatura que es la mejor solución por costo y utilidad ya que estos controladores tiene un fácil seteo de las temperaturas, presentan un indicador de temperatura y entregan una señal digital al PLC, de esta manera se redujo costos en el acondicionamiento de la señal y en el visualizador de temperaturas.



Figura 9 Controladores del horno. a) PLC Siemens LOGO!. b) Controlador Full Gauge MT-622.

SELECCIÓN DE LAS PROTECCION ELÉCTRICAS.

Se debe garantizar que todos los elementos eléctricos que se encuentran dentro de la máquina, estén protegidos contra cortocircuitos, sobrecargas y fallas por aislamiento.

La corriente del disyuntor es igual a la sumatoria de las corrientes nominales de los componentes eléctricos de la máquina.

$$I_{max} = \sum I_{elementos}$$

$$I_{max} = I_{variador} + I_{ventiladores} + I_{quemador} + I_{estractor} + I_{elementos\ de\ control}$$

$$I_{max} = 35A + 4 * 1.8A + 3A + 1A + 3A$$

$$I_{max} = 49.2A$$

Se debe tomar en cuenta que el disyuntor va a realizar un trabajo continuo a una temperatura menor a 40 grados centígrados por lo que se debe multiplicar la corriente nominal del disyuntor por un factor de desclasificación de 1.07 por la temperatura y de 0.9 por trabajo continuo, y el resultado debe ser mayor a la corriente de la carga que se requiere proteger. [7]

$$I_{disyuntor} > \frac{I_{max}}{0.9*1.07}$$

$$I_{disyuntor} > \frac{49.2A}{0.9 * 1.07} = 51.09A$$

El disyuntor comercial que cumple con los requerimientos de corriente es el de 63A, sin embargo la corriente máxima que va a proteger este disyuntor es de:

$$Idisy_{max} = 63A * 0.9 * 1.07 = 60.67A$$

DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

Una vez ingresada la lana al interior de la tolva, el operario debe encender la máquina presionando el botón de arranque (ON). En este momento se debe calentar al horno hasta una temperatura de 120 grados, por lo cual es necesario encender los ventiladores y el quemador de diésel, además se encenderá una luz piloto verde indicando que la maquina se encuentra encendida.

Se enciende el motor principal el cual pone en movimiento al sistema de alimentación de la lana y a la banda transportadora a cierta velocidad con el fin de que la lana ingrese al horno cuando este haya llegado a la temperatura requerida. Luego de este momento la velocidad disminuye manteniendo un ingreso de lana constante, permaneciendo está en el horno alrededor de 19 minutos, a una temperatura, entre 105 y 120 grados centígrados.

Al finalizar el proceso de carbonizado, el operario deberá apagar la maquina presionando el botón de paro (OFF), en este momento se apagara el quemador y el motor principal dejando encendido los ventiladores durante 5 minutos para que el horno se enfrié lo más pronto posible.

Cuando la llama del quemador de diésel no llegue a prenderse, o se apague por cualquier motivo, se pondrá en alarma el sistema, apagando el quemador de diésel, el motor principal, encendiendo el indicador rojo, y luego de 5 minutos se apagaran los ventiladores. Se podrá poner en marcha la maquina reiniciando el quemador de diésel y realizando el encendido normal.

El sistema consta con un paro de emergencia el cual realizara un apagado total de la máquina, para volver a reiniciar a la maquina se deberá desactivar el paro de emergencia y volver a encender de forma normal la máquina.

III. CALIBRACIÓN Y RESULTADOS

Se realizó una prueba de tiempo y temperatura, para que la lana sea carbonizada correctamente. Bajo estos parámetros se podrá llevar un control de calidad del proceso de carbonizado.

Tabla 8 Tiempo y temperatura para el carbonizado.

Tiempo [min]	Temperatura [ºC]	Observaciones
8	120	Lana quemada en su mayoría en la superficie
9	120	Lana bastante quemada
10	115	Lana quemada en la superficie
11	115	Lana ligeramente quemada en la superficie
12	110	Lana presenta pocas quemaduras y restos vegetales internos sin carbonizar
13	110	Lana poco quemada y algunos restos vegetales grandes poco carbonizados
14	105	Lana ligeramente quemada y restos vegetales grandes poco carbonizados
15	105	Lana ligeramente quemada en la superficie
16	100	Restos vegetales no carbonizados
17	100	Restos vegetales carbonizados solo en la superficie
18	105	Lana ligeramente quemada y restos vegetales grandes internos no carbonizados
19	105	Lana ligeramente quemada en la superficie restos carbonizados.
20	110	Lana quemada en la superficie

Con las observaciones de la tabla 8 se procederá a realizar un control de calidad de la lana en el carbonizado del horno.

Tabla 9 Resultados control de calidad de la lana.

Parámetros	Calidad de lana	
	Anterior	Actual
Porcentaje de lana quemada en la superficie	13%	3%
Porcentaje de impurezas luego del abridor de fardos	25%	12%
Porcentaje de impurezas luego del cardado	10%	6%

Para lograr esto los parámetros del tiempo y la temperatura de horneado son de 19 minutos y 105ºC respectivamente. En la figura 10 podemos observar el punto de equilibrio entre el tiempo y la temperatura.

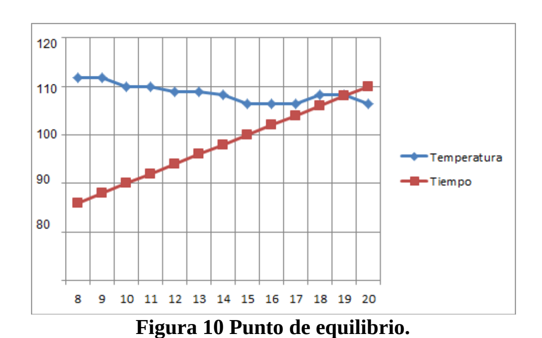


Figura 10 Punto de equilibrio.

IV. CONCLUSIONES.

Se implementó exitosamente el horno automático con alimentación continua para el proceso de carbonizado en la empresa ESPATEX el cual se encuentra trabajando actualmente.

Se pudo determinar que debido a las propiedades de la lana, esta se enreda en los diferentes componentes del sistema de alimentación, y no llega al horno homogéneamente. Esto provoca que el horno procese 45 kg/día sin embargo con mejor materia prima produciría 60 kg/día.

Debido a que la lana es un aislante térmico, el espesor juega un papel importante en el proceso de carbonizado, el cual no debe superar los 10 cm para que alcance una temperatura requerida en todo su volumen. Para lo cual, el sistema alimentación está constituido por rodillos que giran a diferentes velocidades y presentan guarniciones con inclinaciones determinadas, los cuales peinan a la lana y dosifican su espesor.

Las velocidades de alimentación y transporte deben mantener la relación de velocidades 2:4. De esta manera se evita el abultamiento en la transición del sistema de alimentación hacia la banda transportadora.

En la calibración del sistema total se logró encontrar los parámetros adecuados para el proceso de carbonizado de la lana con las características propias que recibe ESPATEX. La temperatura del horno es de 105ºC y la el tiempo de permanencia de la lana de 19 minutos.

Con la implantación de la máquina se reduce la utilización de mano de obra en un 60% durante el proceso de carbonizado, se aumenta en un 9% el carbonizado de los restos vegetales y se evita la quemadura de la lana por temperaturas superiores a los 110 grados centígrados. Adicionalmente, se logra un aumento en la producción de un 32%.

Para la construcción del horno se necesitó de una mayor experiencia en la parte práctica, y debido a la falta de información en la dosificación del espesor de la lana en el sistema de alimentación, se investigó por medio del método ensayo y error hasta lograr reducir el espesor de la lana, lo cual hizo a esta etapa una de las de mayor duración.

V. RECOMENDACIONES.

Para lograr un mejor control sobre el espesor de la lana se debe aumentar un movimiento pausado que alimente la lana a la telera para evitar su acumulación en la extracción de la lana.

Extender las dimensiones del horno en un 30% con el fin de incrementar la velocidad de alimentación y transporte para obtener una producción de 60 kg/día de lana.

Se recomienda que el sistema de alimentación sea ascendente con lo cual se logra una mejor dosificación de la lana, evitando abultamiento en los rodillos.

Se podría utilizar el horno para trabajar en otros procesos como el secado de gorros, secado de madejas de hilatura, entre otras.

La empresa ESPATEX presenta un desbalance de 12 voltios entre las fases y 20 voltios en el neutro, por lo cual se recomienda instalar un transformador propio para sus instalaciones y distribuir sus cargas correctamente.

VI. REFERENCIAS.

[1] A. Mermet, Ventilacion natural de edificios, Editorial Nobuko, 2005.

[2] Y. Cengel, Transferencia de calor, McGraw Hill, 2005.

[3] Scribd, «Determinacion del coeficiente convectivo de transferencia de calor,» 2013. [En línea]. Available: http://www.scribd.com/doc/39533780/-DETERMINAION.

[4] H. Goodfellow y E. Tahti, Industrial ventilation, Academy Press, 2001.

[5] F. Incropera, Fundamentos de Transferencia de calor, Mexico: Prentice Hall, 1999.

[6] D. Esparza, Hilatura Lanera, Ibarra, 2009.

[7] SMA, «Informacion tecnica SMA,» 2013. [En línea]. Available: www.technosun.com/es/descargas/SMA-disyuntor-dimensionado-ES.pdf.

[8] S. &. Palau, «Catalgo ventilacion,» 8 04 2014. [En línea]. Available: http://www.construnario.com/catalogo/soler-palau-sa/catalogos.

[9] J. Welty, Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa, LIMUSA, 2000.

[10] JNG, «Guía práctica de selección y puesta en marcha de variadores de velocidad Sinamics G110/ Micromaster 420,» 2013. [En línea]. Available: http://www.jngdelecuador.com/SITEC%20FEBRERO%2009.pdf.

[11] Siemens, «Instrucciones de uso SINAMICS G110,» 2013. [En línea]. Available: http://cache.automation.siemens.com/dnl/Tg2MzI4NzcA_22102965_HB/G110_OPI_22102965_SP.pdf.

[12] Scribd, «IEEE Std. C37.40-2003,» 2013. [En línea]. Available: http://www.scribd.com/doc/139144097/IEEE-std-C37-40-2003.

[13] Siemens, «Siemens Image Database,» 2013. [En línea]. Available: http://www.automation.siemens.com/bilddb/index.aspx. [Último acceso: 09 08 2013].

[14] F. Gauge, «Manual de usuario,» 2013. [En línea]. Available: http://www.fullgauge.com/es/PDF/MT-622Ri.pdf. [Último acceso: 09 08 2013].

[15] Fabricables, «Conductores aislados tipo TF y TW 60ºC,» 2006. [En línea]. Available: http://www.fabricables.com/tf.html. [Último acceso: 09 08 2013].